Wesen, Begriff und Gesetze

der

physischen Akkommodation.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

verfasst und

der hohen philosophischen Fakultät, Sektion II,

der K. Ludwigs-Maximilians-Universität München

am 26. Juni 1899

vorgelegt von

Anton Killermann

k. Reallehrer.

München.

Buch- und Kunstdruckerei A. Fröhlich.

Wesen, Begriff und Gesetze

der

physischen Akkommodation.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

verfasst und

der hohen philosophischen Fakultät, Sektion II,

der K. Ludwigs-Maximilians-Universität München

am 26. Juni 1899

vorgelegt von

Anton Killermann

k. Reallehrer.

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

München.
Buch- und Kunstdruckerei A. Fröhlich.

Seinem hochverehrten Lehrer

Herrn Dr. Georg Recknagel

k. Rector des Realgymnasiums Augsburg

in Dankbarkeit gewidmet

vom Verfasser.

Wesen, Begriff und Gesetze der physischen Akkommodation.

Wenn wir unser Auge bei konstanter Beleuchtung des Objekts auf einen centralen Fixationspunkt einstellen, unsere Aufmerksamkeit aber auf seitlich befindliche Dinge lenken, so besteht, wie Dr. Heinrich in einer Abhandlung über:

„*Die Aufmerksamkeit und die Funktion der Sinnesorgane*,"

in der Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane, herausgegeben von Herm. Ebbinghaus und Arthur König, in Band IX experimentell gezeigt hat, eine gewisse merkwürdige Abhängigkeit zwischen der Akkommodation unseres Auges, der Pupillengrösse und dem Winkel, unter welchem uns das Objekt seitlich erscheint, in der Weise, dass mit Vergrösserung dieses Winkels hauptsächlich die Pupille und der Radius der Linsenvorderfläche bis zu einem gewissen experimentell bestimmten Grenzwerte sich vergrössern, dann aber gleichzeitig trotz weiterer Vergrösserung des Winkels wieder abnehmen.

Wenngleich in genannter Experimentaluntersuchung einzig und allein, dem Titel entsprechend, der Zusammenhang zwischen der Aufmerksamkeit und der Funktion unseres Gesichtssinnes gezeigt werden soll, so ist hiedurch gleichzeitig experimentell bewiesen, dass die Akkommodation vom Sehwinkel und der Pupillengrösse in hohem Masse abhängig ist. Da nun aber die bisher bekannten Gesetze der mathematischen Akkommodation diese Grössen überhaupt nicht enthalten, ferner weil doch sicherlich die Struktur der die Lichtempfindung dem Gehirn übermittelnden Netzhautelemente nicht ohne jeglichen

Einfluss auf den ganzen Akkommodationsmechanismus sein kann, so muss man notwendiger Weise zu dem Schlusse kommen, dass die mathematische Akkommodation für unser Auge nicht allgemeine Geltung haben kann, dass vielmehr die Einstellung unseres Auges durch andere Gesetze bedingt ist, durch eine physische Akkomodation, welche genannte Mängel nicht enthält und alle durch das äussere Objekt gegebenen Grössenverhältnisse berücksichtigt und dem Bau des menschlichen Auges völlig entspricht.

Gegenwärtige Abhandlung betrachtet diese physische Akkommodation vom mathematisch physikalischen Standpunkte aus unter gewissen, in der mathematischen Untersuchung notwendigen Voraussetzungen, während Dr. Heinrichs Arbeit zum Teil den experimentellen Beweis dieser theoretischen Untersuchung liefert.

Voraussetzungen und Einleitung.

Die Hauptgedanken und Voraussetzungen, welche zu grunde gelegt werden und welche gleichzeitig einen Überblick über die ganze Abhandlung und deren Einteilung geben, sind kurz folgende:

1) Von allen Strahlengattungen werden nur die gelben Strahlen betrachtet, welche unseren Gesichtssinn am meisten reizen und für welche desshalb in erster Linie alle Gesetze gelten müssen.

2) Unter der Annahme, dass der Gesichtswinkel, unter welchem uns das Objekt erscheint, klein ist, was zur Folge hat, dass ebenso alle von irgend einem Punkte des Objekts ausgehenden und ins Auge gelangenden Strahlen ebenderselben Voraussetzung entsprechende Winkel mit der optischen Axe unseres Auges bilden müssen, werden in der Rechnung alle diese Strahlen auf Strahlen reduziert, welche von Punkten der optischen Axe, den Schnitt-

punkten jener Strahlen mit der Axe, herkommen. Dadurch wird das einfache Brechungsgesetz an Kugelflächen, welches in obiger Voraussetzung enthalten ist, leicht anwendbar auch für Strahlen, die von Objektspunkten herrühren, welche nicht in der optischen Axe liegen.

3) Da durch die kleine Öffnung in der Iris, durch die Pupille, nur ein gewisser Teil der ins Vorderauge bereits eingedrungenen Lichtstrahlen hindurchgeht und ins hintere Auge und auf die Netzhaut gelangt, so wird nur dieser Teil, als der das Netzhautbild wirklich erzeugende Teil der Strahlen in Rechnung gezogen und alle übrigen Strahlen vollständig ausgeschlossen. Hiedurch geht die Pupillengrösss in die mathematische Betrachtung ein.

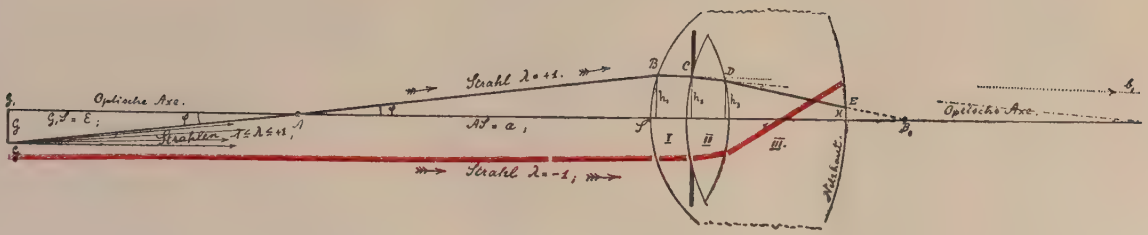
4) Die gefundenen Formeln zeigen, wie wir sehen werden deutlich die Abhängigkeit des Netzhautbildes von der Pupillengrösse; ferner ist ersichtlich, dass alle von einem Punkte des leuchtenden Objekts, wenn derselbe ausserhalb der optischen Axe des Auges liegt, kommenden und ins Auge vordringenden Strahlen sich nicht wieder in einem einzigen Punkte der Netzhaut treffen müssen, auch wenn letzteres für centrale Strahlen gilt. Die Bedingung nun, unter welcher auch jene von nicht centralen Punkten kommenden Lichtstrahlen sich wieder in einen einzigen Punkte der Netzhaut vereinigen, gibt uns das Gesetz der mathematischen Akkommodation. Es wird jedoch gezeigt, dass diese mathematische Akkommodation für unser Auge durchaus keine allgemeine Geltung haben kann, ferner wegen der Struktur unserer Netzhaut überhaupt zur scharfen Einstellung gar nicht notwendig ist und auch keineswegs den Erfahrungen über unseren Akkommodationsmechanismus entspricht. Desshalb wird der weitaus wichtigere Begriff der physischen Akkommodation in der mathematischen Betrachtung verwendet, wodurch die Struktur der Netzhaut hervorragende Berücksichtigung findet, ausserdem das Wesen dieser physischen Akkommodation durch mathematische Formeln

erklärt und beschrieben und hauptsächlich für die Grenzfälle der Akkommodation einer eingehenden Betrachtung unterzogen.

5) Unter der Bedingung, dass das Volumen der Krystallinse, auch bei veränderter Akkommodation, stets konstant bleibt und einen experimentell bestimmten Wert beibehält, wird hierauf an Hand der abgeleiteten Akkommodationsgesetze durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate eine Correktur und Berechnung angegeben für die durch die Akkommodation veränderlichen Grössen des auf deutliche Sehweite eingestellten Normalauges, soweit dieselben als mittlere von den Forschern angegebene Werte einer Correktur bedürfen.

Mit Rücksicht auf obige Voraussetzungen ergeben sich folgende mathematische Gesetze:

Das Auge.


Optische Axe.
Strahlen
Strahl λ = +1.
Strahl λ = −1;
Netzhaut.
Optische Axe.
I
II
III.

I. Teil.

Allgemeine Ableitung der Gesetze,

welche alle wirklich auf die Netzhaut gelangenden gelben Strahlen befolgen.

In der Entfernung G (über oder) unter der optischen Axe unseres Auges und in der gegen die Grössenverhältnisse in unserem Auge (in *mm* gegeben) bedeutenden Entfernung E (in Metern od. cm gegeben) von der Hornhautfläche befinde sich ein leuchtender Punkt. Der Winkel, unter welchem ein von diesem Punkte ausgehender Strahl die optische Axe schneidet, werde φ genannt.

Nach der Brechung durch die Hornhaut geht der Strahl durch die Pupille, kommt auf die Krystallinse, gelangt durch dieselbe in den Glaskörper und durch diesen auf die Netzhaut

Der Weg dieses Strahles ist durch folgende Gleichungen festgelegt. Da, wie erwähnt, alle Strahlen auf Strahlen von Punkten der optischen Axe aus reduziert werden und der von G kommende Strahl die optische Axe in A schneidet, so ist $AS = a$ . . . Gegenstandsweite für diesen Strahl. (Siehe beiliegende Zeichnung.)

Hornhaut-Brechung:

$$\frac{1}{a} + \frac{n}{b_1} = \frac{n-1}{r_1};$$ **(Brechung an der Hornhaut.)**

$$b_1 = \frac{anr_1}{a\,(n-1) - r_1};$$ wobei:

a = Gegenstandsweite;
b_1 = Bildweite = Entfernung desjenigen Punktes der Axe, wo der gebroch. Strahl die Axe wieder trifft;
r_1 = Radius der Hornhautkrümmung;
n = Brechungsindex;

Die Höhe h_1 in welcher der Strahl die Hornhaut trifft, berechnet sich den Annahmen zufolge:

$$h_1 = E\,tg\varphi - G;$$

$$a = AS = \frac{E\,tg\varphi - G}{tg\varphi};$$

Diese Werte oben eingesetzt ergeben:

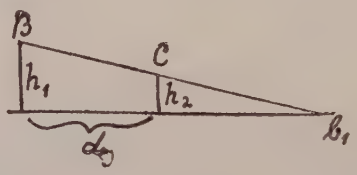
$$\left|\begin{array}{l} b_1 = \dfrac{(E\,tg\varphi - G)\,nr_1}{(E\,tg\varphi - G)\,(n-1) - r_1 tg\varphi} = \text{Bildweite.} \\ h_1 = E\,tg\varphi - G; \end{array}\right.$$

Setzt man statt des konstanten Wertes $\frac{G}{E} = tg\alpha$, wobei α den Gesichtswinkel bedeutet, so erhält man:

$$b_1 = \frac{(tg\varphi - tg\alpha)\,nr_1}{(tg\varphi - tg\alpha)\,(n-1) - \frac{r_1 tg\varphi}{E}} = \frac{h_1 nr_1 E}{h_1((n-1)E - r_1) - r_1 E\,tg\alpha};$$

$$h_1 = E\,(tg\varphi - tg\alpha);$$

Der Strahl BC gelangt durch die vordere Augenkammer hindurch auf die Krystallinse. Ist h_2 die Höhe, in welcher die Vorderfläche der Linse von dem vordringenden Strahle getroffen wird, so ergibt sich:



$h_2 = h_1 \dfrac{b_1 - d_1}{b_1}$; wenn d_1 = Abstand des Scheitels der Linse vom Scheitel der Hornhaut.

Die Grösse h_2 hat aber für die weitere Betrachtung nur dann eine Bedeutung, wenn dieselbe dem absoluten Werte nach kleiner oder höchstens ebenso gross ist als der Radius der Pupille (p). Daher muss allgemein:

$h_2 = \lambda p$; wobei λ variabel und . . . . $-1 \leqq \lambda \leqq +1$;

Ist nämlich h_2 grösser als $\pm p$, so wird der durch die Hornhaut bereits eingedrungene Lichtstrahl in seinem weiteren Vordringen durch die Iris aufgehalten und gelangt dann überhaupt nicht auf die Linse und daher auch nicht auf die Netzhaut. Hiedurch ist nun die Beziehung gegeben, welche h_1 aus dem gegebenen λp stets zu berechnen gestattet und dadurch den Winkel φ in seiner Abhängigkeit von λ darstellt. Diese Beziehung heisst:

$$h_2 = \lambda p \leqq h_1 \cdot \frac{h_1\,[nr_1E - d_1((n-1)\,E - r_1)] + Ed_1r_1tg\alpha}{h_1nr_1\,E}$$

und ergibt:

$$h_1 = Er_1\,\frac{n\lambda p - d_1tg\alpha}{AE + d_1r_1}\;;$$ wobei statt n: . . . . $(r_1 - d_1) + d_1 = A$ substituiert wurde.

Weiterhin ergibt sich:

$$tg\varphi = \frac{nr_1\lambda p - AEtg\alpha}{AE + d_1r_1}\;;$$

$$b_1 = \frac{r_1E\,(n\lambda p - d_1tg\alpha)}{\lambda p\,((n-1)E - r_1) - Er_1tg\alpha}\;;$$

$$h_2 = \lambda p\;;$$

Durch diese von der Variablen λ abhängigen Beziehungen sind nun sämmtliche Strahlen völlig festgelegt, welche durch die Pupille wirklich in das hintere Auge gelangen; alle anderen Strahlen sind nunmehr ausgeschlossen. Alle diese Strahlen liegen in einer einzigen durch den leuchtenden Punkt und die Augenaxe bestimmten Ebene.

Brechung an der Vorderfläche der Krystallinse.

Bezeichnet r_2 . . . den Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche und N . . . den Berechnungsindex der gelben Strahlen aus dem Medium vor der Linse in diese, so gilt für das weitere Vordringen des Strahles in die Krystallinse:

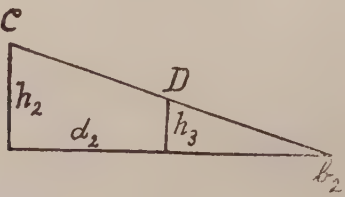
$$\frac{1}{-(b_1 - d_1)} + \frac{N}{b_2} = \frac{N-1}{r_2}\;;$$ wobei b_2 = gesuchte Bildweite,

woraus folgt: $b_2 = \frac{Nr_2\ (b_1 - d_1)}{(N-1)\ (b_1 - d_1) + r_2}$;

Nach geschehener Substitution von b_1 in die erhaltene Formel, findet man:

$$\boxed{b_2 = \frac{Nr_2}{(N-1) + z}}$$

wobei $z = \frac{r_2\ [\lambda p\ ((n-1)\ E - r_1) - Er_1\ tg\alpha]}{\lambda p\ (AE + d_1 r_1)}$;



Ist d_2 die Dicke der Krystallinse und trifft der gebrochene Strahl CD in der Höhe h_3 die Hinterfläche der Linse, so berechnet sich dieses h_3 zu:

$h_3 = h_2 \frac{b_2 - d_2}{b_2}$; und weiterhin zu . . . .

$\boxed{h_3 = \frac{(B - d_2 z)\ \lambda p}{Nr_2}}$; ${}_2B^u = N\ (r_2 - d_2) + d_2$ substituiert.

Brechung an der Hinterfläche der Linse.

Im Punkte D der Hinterfläche der Linse wird der Strahl in den Glaskörper gebrochen. Wenn r_3 der Krümmungsradius der hinteren Linsenfläche und $N' = N$ der Brechungsindex für Gelb aus dem Glaskörper in die Linse ist, so geht der Strahl nach folgenden Gesetzen weiter:

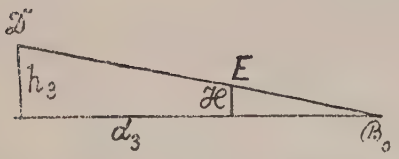
$$\frac{1}{-(b_2 - d_2)} + \frac{1}{Nb_3} = \frac{\frac{1}{N} - 1}{-r_3};\ b_3 = \text{gesuchte Bildweite};$$

Daraus: $\underline{b_3 \equiv B_0 = \frac{r_3\,(B - d_2 z)}{D + Cz}}$ = Bildweite.

wenn $B = N\,(r_2 - d_2) + d_2$;

$C = N\,(r_3 - d_2) + d_2$;

$D = (N - 1)\,[B + Nr_3]$;



Bezeichnet d_3 den Abstand der Netzhaut vom Scheitel der hinteren Linsenfläche und H die Höhe, in welcher die Netzhaut vom Strahle getroffen wird, so findet man:

$$H = h_3 \cdot \frac{B_0 - d_3}{B_0};$$

$$\underline{H = \frac{(r_3 B - d_3 D) - z\,(d_2 r_3 + d_3 C)}{N r_2 r_3} \cdot \lambda p};$$

Die hier vorkommende Grösse d_3 ist, wie allgemein angenommen wird, konstant, da sich weder der Scheitel der hinteren Linsenfläche noch auch die Netzhaut verschiebt. Diese Grösse wurde von Listing berechnet und ergibt sich auch hier aus der oben gefundenen Formel für B_0 wenn man in derselben $E = \infty$ und $\alpha = o$ setzt und die von Listing angegebenen Grössenverhältnisse in unserem Auge bei Akkommodation auf Unendlich benützt. Die Rechnung wurde hier auch ausgeführt und ergab . . . $d_3 = 14{,}64727$ mm, wenn die Angaben:

$$\left\{\begin{array}{l} r_1 = 8 \text{ mm}; \\ r_2 = 10 \text{ mm}; \; n = \frac{103}{77}; \\ r_3 = 6 \text{ mm}; \\ d_1 = 4 \text{ mm}; \; N = \frac{16}{11} \cdot \frac{77}{103}; \\ d_2 = 4 \text{ mm}; \end{array}\right\} \text{von Listing verwendet werden.}$$

Formt man den Wert von H weiter um, so lässt er sich schliesslich bei Substitution von:

$$x = A\,(r_3B - d_3D) - (n-1)\,r_2\,(d_2r_3 + d_3C);$$
$$y = r_1\,[d_1\,(r_3B - d_3D) + r_2\,(d_2r_3 + d_3C)];$$
$$w = r_1r_2\,(d_2r_3 + d_3C);$$

auf die Form bringen:

$$\boxed{H = \frac{\lambda p\,(xE + y) + Etg\alpha \cdot w}{Nr_2r_3\,(AE + d_1r_1)}} = \text{Höhe, in welcher der Strahl d. Netzhaut trifft.}$$

Die Brennweite des ganzen Auges, gerechnet von der hinteren Linsenfläche aus, ergiebt sich bei irgend einem Akkommodationszustand dadurch, dass man in $B_0 =$ der gefundenen schliesslichen Bildweite .... $E = \infty$ und $\alpha = o$ setzt. Nach einigen Umformungen erhält man:

$$\boxed{F = \textit{Brennweite} = d_3 + \frac{x}{AD + Cr_2\,(n-1)}};$$

Diese hier abgeleiteten Beziehungen nun bestimmen jeden in der durch die optische Achse und den leuchtenden Punkt gelegten Ebene verlaufenden Strahl, wenn derselbe, was durch λ reguliert wird, bis zur Netzhaut vordringt. Lässt man α und E konstant, so bekommt man, wenn λ alle Werte von $+1$ bis -1 durchläuft, alle von einem einzigen leuchtenden Punkte in der bezeichneten Ebene liegenden und auf die Netzhaut gelangenden Strahlen. Aus der Formel für H, die sich als lineare Funktion des Pupillenradius ergab, ist nun ersichtlich, dass im Allgemeinen, bedingt durch die Variable λ, sich Lichtstrahlen, die von einem einzigen Punkte kommen, auf der Netzhaut nicht wieder zu einem einzigen Bildpunkt vereinigen werden. Es müssen also, um diese Wirkung genau oder in gewissen Grenzen zn erzielen, noch andere Bedingungen gelten, deren Aufsuchen die weitere Aufgahe der gegenwärtigen Abhandlung ist.

II. Teil.

Die Akkommodation.

Die Erfahrung lehrt uns, dass unser Auge auf Gegenstände von mässiger Grösse sich einstellt, akkommodiert; d. h. dass sich verschiedene Grössen unseres Auges, von welchen der Gang der Lichtstrahlen hauptsächlich abhängt, so ändern, dass ein *möglichst scharfes Bild* auf unserer Netzhaut entsteht, welches uns durch den Gesichtssinn zum Bewusstsein kommt. In welcher Weise nun der Ausdruck: „Möglichst scharfes Bild" oder „möglichst scharfe Einstellung" definiert wird, davon hängt die Verschiedenartigkeit der Begriffe der mathematischen und der physischen Akkommodation ab.

„Mathematische" Akkommodation:

Will man durch den Ausdruck: „scharfe Einstellung" aussagen, dass sich alle von einem einzigen Punkte ausgehenden und ins Auge gelangenden Strahlen genau wieder in einem einzigen mathematischen Punkte auf der Netzhaut vereinigen sollen und müssen, so hat man hiedurch das Wesen der mathematischen Akkommodation erklärt.

„Physische" Akkommodation:

Physisch dagegen definiert bedeutend der Ausdruck: „Scharfe Einstellung" einen derartigen gesetzmässigen Vorgang in unserem Auge, dass die von *einem* Punkte ausgehenden, ins Auge gelangenden Strahlen so zusammengehalten werden, dass wir vermöge der Netzhautstruktur nicht mehr wahrnehmen können, ob sich die Strahlen wirklich wieder in *einem* Punkt vereinigen oder nicht. Mit anderen Worten ausgedrückt stellt unser Auge dann noch scharf ein, wenn wir dank der Struktur unserer Netzhaut von einer wirklich stattfindenden Zerstreuung der von einem Punkte ins Auge gelangenden Lichtstrahlen nichts merken.

Wiewohl der Begriff der physischen Akkommodation der weitaus wichtigere, den thatsächlichen Verhältnissen entsprechende ist, werden doch der Allgemeinheit halber beide Akkommodations-Arten hier näher betrachtet, um die unterscheidenden Merkmale dieser beiden Arten genauer kennen zu lernen und hiedurch auch von der mathematischen Seite zu einem Schlusse, ob die eine oder andere Akkommodation richtig oder falsch ist, berechtigt zu sein.

Gesetze der Akkommodation.

Mathematische Akkommodation.

Der vorausgehenden Definition entsprechend muss für mathematische Akkommodation die Grösse H = Entfernung des jeweiligen Netzhautbildes von der Mitte der Netzhaut, unabhängig werden von der Variablen λ, da diese ja die Verschiedenheit der H für Lichtstrahlen, die von einem einzigen Punkte kommen, bedingt. Diese Grösse H hat sich oben ergeben:

$$H = \frac{\lambda p\,(xE + y) + E w \operatorname{tg} \alpha}{N r_2 r_3\,(AE + d_1 r_1)};$$

Damit nun jene Bedingung erfüllt ist und stets erfüllt bleibt, muss die Beziehung gelten:

Bedingung für math. Akkommodation:

$$\underline{\underline{xE + y = 0}};$$

Weiter ergeben sich bei Benützung der gefundenen Beziehung folgende Formeln:

$$H = \frac{E w \operatorname{tg} \alpha}{N r_2 r_3\,(AE + d_1 r_1)};$$ (Bildgrösse.)

$$F = d_3 - \frac{y}{E\,(AD + C r_2\,(n - 1))};$$ (Brennweite.)

Die Bedingung für mathematische Akkommodation lässt leicht erkennen, dass letztere völlig unabhängig von der Struktur unserer Netzhaut, vom Gesichtswinkel, unter welchem uns

ein Gegenstand erscheint, und von der Pupillengrösse ist. Es ist die mathematische Akkommodation nur eine Abhängigkeitsbeziehung zwischen den optischen Grössen unseres Auges und der Entfernung E des betrachteten Gegenstandes.

Prüft man nun die hier erhaltenen Gesetze auf ihre Übereinstimmung hin mit der thatsächlich für das menschliche Auge geltenden Akkommodation, so ergeben sich folgende Unterschiede:

1. Zunächst ergab sich die mathematische Akkommodation als unabhängig von der Struktur der die Lichtempfindung übermittelnden Netzhautelemente. Diese Unabhängigkeit schliesst notwendigerweise eine stetige, bis in die kleinsten Teile genaue, kontinuierliche Struktur der Netzhaut in sich, da im andern Falle ja eine mathematische Akkommodation für unser Auge bedeutungslos wäre, insofern wir von einer mathematisch genauen Einstellung doch keine Empfindung haben würden. Unsere Netzhaut hat aber, wie durch Versuche genauestens feststeht, keine stetige Struktur, es finden sich vielmehr zwischen den die Lichtempfindung aufnehmenden, verschieden grossen Stäbchen und Zapfen kleinere und grössere Zwischenräume.

2. Da ferner die mathematische Akkommodationsbedingung völlig unabhängig erscheint vom Gesichtswinkel, so müssten wir notwendig bei Betrachtung eines einzigen Punktes eines Gegenstandes alle übrigen Punkte desselben gleichzeitig mit gleicher Genauigkeit sehen, also auf den Gegenstand sowohl in seinen kleinsten Teilen als auch im Ganzen gleichzeitig mit grösster Genauigkeit akkommodieren können. Dieses widerspricht aber vollständig der Erfahrung. Bei einiger Aufmerksamkeit nehmen wir selbst leicht an unserem Auge wahr, dass die Akkommodation eine andere ist, ob wir einzelne Punkte des Gegenstandes betrachten oder den ganzen Gegenstand überblicken wollen. Übrigens hat Dr. Heinrich experimentell genauestens in der oben schon erwähnten Abhandlung die Abhängigkeit der Akkommodation vom Gesichtswinkel bewiesen.

3. Ebenderselbe hat ferner durch Experimente auch dargelegt, dass die Pupille bei der Akkommodation eine grosse Rolle spielt. Die mathematische Akkommodation lehrt uns das Gegenteil, so dass also die Pupille bei der Akkommodation nichts zu sagen hätte und etwa nur die Regelung der Lichtintensität des Netzhautbildchens bewerkstelligen dürfte.

Diese Erkenntnisse und Thatsachen nochmals zusammenfassend, müssen wir unbedingt zu dem Schlusse kommen, der auch allgemein in der Physiologie anerkannt ist:

„Die mathematische Akkommodation ist für unser Auge wegen der Netzhautstruktur nicht erforderlich und würde eine viel zu hohe, nicht erfüllbare Anforderung — Anstrengung — an unser Auge stellen; die mathematische Akkommodation ist ferner sogar falsch, da dieselbe nicht in Übereinstimmung ist mit den Thatsachen, dass unser Akkommodationsmechanismus in hohem Grade vom Gesichtswinkel und von der Pupillengrösse abhängt."

Desshalb wird die mathematische Akkommodation nunmehr, als für unser Auge ungiltig, verlassen und die allgemeinere, viel wichtigere physische Akkommodation betrachtet.

Physische Akkommodation.

Um zu zeigen, welche allgemeinen Gesetze die Akkomodation befolgt, wenn wir nicht eine vollkommen mathematische verlangen, sondern eine dem Bau unseres menschlichen Auges entsprechende und dadurch bedingte, wird folgender Weg eingeschlagen:

Nach der Brechung im Auge bilden die von dem gegebenen leuchtenden Punkte ($tg\alpha$ u. E) herrührenden Strahlen in ihrer Gesammtheit einen kleinen Lichtkegel, der im allgemeinen durch die Netzhaut nahezu in einem Kreise geschnitten wird. Unter denjenigen hier nur betrachteten Strahlen, welche in der durch die optische Axe und den leuchtenden Punkt gelegten Ebene liegen, und welche durch das variable λ völlig bestimmt sind, bilden sicher die durch $\lambda = +1$ und $\lambda = -1$ gegebenen Grenzstrahlen ein Maximum und Minimum

bezüglich der oben berechneten Grösse *H*. Diese Strahlen werden von den lichtempfindlichen Netzhautelementen, den Zapfen und Stäbchen, aufgefangen; doch geschieht dies nur teilweise. Da nämlich diese Elemente, wenn sie auch dicht aneinander liegen, doch stets einen gewissen, kleinen, messbaren, mit der Entfernung von der Netzhautgruppe veränderlichen Abstand von einander besitzen, so wird in diesen, für die Lichtempfindung toten Zwischenraum ein Teil der Strahlen fallen. Auch sind die lichtempfindlichem Netzhautelemente selbst in ihren gegenseitigen Grössenverhältnissen verschieden und dadurch proportional ihrer Grösse einer stärkeren oder schwächeren Lichtaufnahme fähig.

Eine für unser Auge gerade noch ausreichende Akkommodation tritt dann ein, wenn der erwähnte Schnittkreis des Strahlenkegels mit der Netzhaut in seinen äussersten Teilen die nächsten in der Meridianebene gelegenen, lichtempfänglichen Netzhautelemente berührt. Ist dieses nämlich der Fall, so empfängt hauptsächlich bloss ein einziges Netzhautelement die ganze Lichtwirkung und wir müssen dann notwendig die Empfindung haben, einen einzigen Punkt genau zu sehen, weil wir eben nur einen einzigen Reiz des Sehnervs empfinden werden. Indess ist der bezeichnete Fall die Grenze der Akkommodation; umfasst und enthält der Schnitt des Lichtkegels mehrere Elemente, so akkommodiert das Auge nicht mehr auf den leuchtenden Punkt, wir glauben entsprechend der grösseren Anzahl von Reizen mehrere Punkte statt eines einzigen zu sehen. Wird dagegen der das Netzhautelement umschliessende Schnittkreis immer kleiner, so muss auch die Akkommodation eine bessere werden, da ja nunmehr die Concentration der Strahlen im Netzhautelement eine grössere ist.

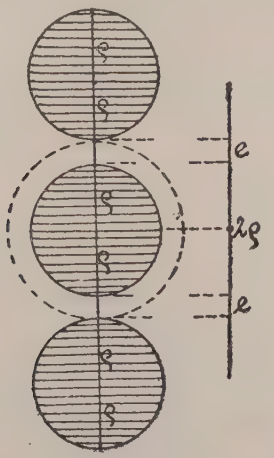
Akkommodiert unser Auge auf einen Gegenstand, so wird gleichzeitig für alle Punkte desselben das oben Gesagte gelten. Am auffälligsten indes werden wir das Vorhanden oder Nichtvorhandensein einer Akkommodation an den Rändern des Netzhautbildchens konstatieren können, was hauptsächlich durch den Kontrast bedingt wird. Desshalb muss in erster Linie das oben Gesagte für diese Ränder gelten entsprechend ihrer

Entstehung durch Punkte des Gegenstandes. Erfüllen aber die Ränder des Netzhautbildchens genannte Bedingung, so werden wir wohl auf mittlere Teile des Gegenstandes gleich gut akkommodieren wie auf die Ränder; übrigens, selbst dieses nicht zugestanden, so werden wir ein Fehlen der Akkommodation für mittlere Teile des Gegenstandes nicht besonders empfinden. Betrachten wir dagegen nur einzelne Punkte des Objekts, so muss die Bedingung nur für diese Punkte erfüllt sein; das Auge braucht alsdann nicht auf den uns sonst gleichgiltigen ganzen Gegenstand sich einzustellen. Dieser wichtige Unterschied, den man durch die Begriffe: „Akkommodation auf Übersicht" und „Akkommodation auf Details" bezeichnen kann, hat jedoch in der mathematischen Betrachtung keine Bedeutung, da diese allgemein auf den Gesichtswinkel, der jene Verschiedenheit durch seine Grösse veranlasst, Rücksicht nimmt.

Mathematische Betrachtung der physischen Akkommodation.

Denkt man sich eine kreisförmige Scheibe, deren Mittelpunkt in der optischen Axe des Auges liegt und deren Rand unter dem Winkel α gegen die optische Axe vom Auge aus erscheint, so akkommodiert den vorhergehenden Betrachtungen zufolge unser Auge noch auf den Rand der Scheibe und damit auf die Scheibe selbst, wenn für die Grenzstrahlen in einer Meridianebene . . . H_{+1} und H_{-1} . . ., entsprechend den Werten $\lambda = +1$ und $\lambda = -1$, so beschaffen ist, dass die Differenz: . . . . . $|H_{+1} - H_{-1}|$ absolut genommen, kleiner oder höchstens ebenso gross ist als die Gesammtbreite eines Netzhautelementes an der betreffenden Stelle der Netzhaut einschliesslich der nach beiden Seiten in der Meridianebene befindlichen kleinsten Zwischenräume bis zu den Nachbarelementen. Natürlich ist die genannte Breite nicht identisch mit der Breite oder Dicke eines Zapfens oder Stäbchens, sondern stellt nur die Dicke des die Lichtwirkung aufnehmenden Teiles des Netzhautelementes dar; ebenso sollen die Zwischenräume die nicht für Lichtempfindung geeigneten

Teile der Netzhautelemente und der Netzhaut bedeuten rings um ein die Lichtwirkung aufnehmendes Element.



Bezeichnet . . . . ϱ . . . . die halbe Dicke (Radius) eines lichtempfänglichen Netzhautelementes,

. . . . . e . . . . den kleinsten Abstand benachbarter lichtempfänglicher Elemente,

so lautet die Beziehung der physischen Akkommodation:

$$\left| H_{+1} - H_{-1} \right| \geqq 2\,(\varrho + e);$$

Drückt ferner k . . . irgend eine innerhalb der Grenzen $+1$ und -1 liegende Verhältniszahl aus, so ergibt sich die Akkommodationsbedingung allgemein:

Bedingung für phys. Akkommodation:

$$H_{+1} - H_{-1} = 2\,k\,(\varrho + e); \qquad -1 \geqq k \leqq +1.$$

Die Grösse . . . . $H_{+1} - H_{-1}$ . . . . ergibt sich aus den oben abgeleiteten Gesetzen durch den Ausdruck:

$$H_{+1} - H_{-1} = \frac{2p\,[xE + y]}{Nr_2\,r_3\,[\Delta E + d_1 r_1]};$$

Von den Grössen . . . ϱ und e . . . der Netzhaut wissen wir bekanntlich aus Messungen, dass sie durchaus keine konstanten Grössen sind. Wir wissen, dass die Zapfen und Stäbchen nach aussen hin, von der Mitte der Netzhaut aus gerechnet, dünner und ihre Abstände von einander grösser werden. Indes ist uns die Gesetzmässigkeit, welche genannte Grössen in dieser Hinsicht erfüllen, völlig unbekannt. Um diese Grössen aber in die Rechnung einführen zu können, wird über die Gesetzmässigkeit, die ϱ und e zu erfüllen haben, verfügt. Die einfachsten möglichen Beziehungen sind die lineare, weshalb hier . . . . . .

$$. . . . . \varrho = \varrho_0 + \delta H' = f(\varrho_0 H') . . . . . .$$

$$. . . . . e = e_0 + \eta H' = \varphi(\varrho_0 H') . . . . . .$$

gesetzt wird. Hiebei bedeuten . . . ϱ_0 . . . den konstanten Radius des in der Mitte der Netzhautgrube gelegenen Netzhautelementes, . . . e_0 . . . den kleinsten, konstanten Abstand benachbarter Netzhautelemente in der Netzhautgrube, . . . δ und η . . . konstante, positive oder negative Proportionalitätsfaktoren und . . . H' . . . die mittlere Entfernung, in welcher von der Mitte der Netzhautgrube aus das Bild des betrachteten leuchtenden Punktes zustande kommt. Dass diese mittlere Entfernung genommen werden darf und muss, ist desshalb gerechtfertigt und notwendig, weil hauptsächlich die mittleren Strahlen des von einem Punkte ins Auge dringenden Lichtkegels den Bildpunkt auf der Netzhaut bedingen werden. Als arithmetisches Mittel ergibt sich . . . H' . . . aus den Werten H_{+1} und H_{-1} . . . . . .

$$H' = \frac{H_{+1} + H_{-1}}{2} = \frac{E w \operatorname{tg} \alpha}{N r_2 r_3 (AE + d_1 r_1)};$$

Dieser Wert in die oben aufgestellten Gleichungen eingesetzt gibt:

$$\varrho = \varrho_0 + \delta \frac{E w \operatorname{tg} \alpha}{N r_2 r_3 (AE + d_1 r_1)};$$

$$e = e_0 + \eta \frac{E w \operatorname{tg} \alpha}{N r_2 r_3 (AE + d_1 r_1)};$$

und nach einigen Umformungen nunmehr die allgemeine physische Akkommodationsbedingung, wobei statt:

$$\left.\begin{array}{l} \ldots\ldots \varrho_0 + e_0 = R_0 \\ \ldots\ldots \vartheta + \eta = \mu \end{array}\right\} \ldots \text{gesetzt wurde:}$$

Allgemeine Akkommodationsbedingung.

$$\mathbf{P = k.}$$

$$P = \frac{p\,(xE + y)}{R_0 N r_2 r_3 (AE + d_1 r_1) + \mu E w \operatorname{tg}\alpha} = k;$$

Hierin bedeutet:

p = Pupillenradius;

$x = A\,(r_3 B - d_3 D) - (n-1)\,r_2\,(d_2 r_3 + d_3 C)$;

$y = r_1\,[d_1(r_3 B - d_3 D) + r_2\,(d_2 r_3 + d_3 C)]$;

$w = r_1 r_2\,(d_2 r_3 + d_3 C)$;

E = Entfernung des Gegenstandes;

α = Gesichtswinkel;

R_0 und μ . . . Netzhautkonstante;

k . . Variable . . . $-1 \leq k \leq +1$.

Bei Benützung der erhaltenen allgemeinen Akkommodationsbedingung für die früher gewonnenen allgemeinen Formeln erhält man die Grösse H . . . (Bildgrösse):

$$\textit{Bildgrösse: } H = \frac{Ew\,(1 + \lambda k \mu)}{N r_2 r_3\,(AE + d_1 r_1)}\ \operatorname{tg}\alpha + \lambda k R_0;$$

= Radius des Netzhautbildchens, das durch die erwähnte leuchtende Scheibe entworfen wird.

Die äussersten Werte der Bildgrösse, nämlich . . . . H_{+1} und H_{-1} ergeben sich:

Für $\lambda = +1$ . . . . . .

$$H_{+1} = \frac{Ew\,(1 + k\mu)}{N r_2 r_3 (AE + d_1 r_1)}\ \operatorname{tg}\alpha + k R_0;$$

für $\lambda = -1$ . . . . . .

$$H_{-1} = \frac{E w\,(1 - k\mu)}{N r_2 r_3 (AE + d_1 r_1)}\, tg\,\alpha - k.R_0;$$

Die Grösse k, welche nunmehr in allen Formeln auftritt, drückt ihrer Bedeutung nach mathematisch den Grad der vorhandenen Akkommodation aus und dient uns als „Mass der Akkommodationsstärke". Die Grenzwerte $k = 1$ und $k = -1$ bestimmen die gerade noch bestehende Akkommodation. Ist k und daher P grösser als die absolute Einheit, so besteht für das betreffende Auge keine Akkommodation mehr. Die Bedingung für Akkommodationszustand und für Akkommodationslosigkeit ist:

Akkommodationszustand: $P \lessgtr \pm 1.$

Akkommodationslosigkeit: $P \geqq \pm 1.$

Ohne besondere Berechnungen notwendig zu machen lässt die abgeleitete Akkommodationsbeziehung $P = k$ folgende Gesetze erkennen:

Als vollständig allgemeiner Fall von Akkommodation enthält dieselbe auch den Spezialfall der mathematischen Akkommodation. Man braucht nur . . . $R_0 = o$ und $\mu = o$ . . . zu setzen, wodurch eine bis in die kleinsten Teile stetige Struktur der die Lichtwirkung aufnehmenden Netzhautelemente zum Ausdruck gebracht würde und man erhält sofort . . . $xE + y = o$; . . . die Bedingung für mathematische Akkommodation. . . .

Weiterhin bekundet die Formel ihre Abhängigkeit vom Pupillenradius, von der Gegenstandsweite und vom Gesichtswinkel. Ausserdem finden sich in der Bedingung sämmtliche, das optische System unseres Auges bildende Grössen und tragen zu Akkommodation wesentlich bei. Eine hervorragende Rolle aber spielen, wie leicht zu ersehen ist, die Grössen:

p . . . . Pupillenradius; r_2 . . . . Krümmungsradius der Linsenvorderfläche;	(Innere Grössen.)
E . . . . Gegenstandsweite, α . . . . Gesichtswinkel.	(Äussere Grössen.)

Die Sonderstellung von r_2 gegenüber anderen Grössen wird dadurch klar, dass r_2 im Nenner von P als Faktor heraustritt, da ja w auch r_2 als Faktor besitzt.

Wenngleich auch eine nähere und eingehendere Diskussion der allgemeinen Akkommodationsbeziehung bezüglich obiger 4 Grössen durch die vielen Konstanten und durch die vielen Variablen, welche den Akkommodationsmechanismus bedingen und welche noch verschiedene andere Bedingungen erfüllen dürften, zunächst sehr erschwert erscheint und fast übergangen werden muss, so ist doch aus dieser komplizierten Funktion einzusehen, dass in Übereinstimmung mit den von Dr. Heinrich angestellten Experimenten hauptsächlich der Pupillenradius und der Krümmungsradius der Linsenvorderfläche die Akkommodation auf den durch E und α gegebenen Gegenstand regeln und bewirken unterstützt von allen übrigen Grössen unseres Auges. Nimmt man beispielsweise . . . k und E konstant, so wird sich bei Vergrösserung von α auch die Pupille vergrössern müssen, um den Wert von P konstant $= k$ zu erhalten und umgekehrt.

Grenzfälle der Akkommodation.

Aus den erwähnten Gründen wird daher hier die allgemeine Akkommodationsgleichung nicht weiter diskutiert, dafür aber die Grenzfälle der Akkommodation einem ihrer hohen Bedeutung entsprechenden eingehenden Studium unterzogen.

Bekanntlich muss man beim akkommodierten Auge unterscheiden zwischen der Einsellung auf Nahepunkt, deutliche Sehweite und Fernpunkt. Nahepunkt und Fernpunkt bedeuten hinsichtlich E die Grenzen der Akkommodation. Diesseits des Nahepunktes und ebenso jenseits des Fernpunktes findet keine Akkommodation statt, während in der deutlichen Sehweite die Akkommodation die denkbar beste ist. Bezeichnen wir mit . . . . . S bezw. s . . . die Entfernungen des Fern- bezw. Nahepunktes und mit . . . Σ die deutliche Sehweite, und erinnern wir uns an den bekannten Scheinerschen Versuch, so wissen wir, dass derselbe für $E = S$ und für $E = s$ ex-

perimentell die Grenzen der Akkommodation zeigt. Weiterhin aber lehrt derselbe, dass für . . . $E < s$ . . . . die von einem Punkte durch die Löcher des Kartenblattes ins Auge gelangenden Strahlen sich erst hinter der Netzhaut schneiden, während für . . . . $E > S$ . . die Strahlenbündel schon vor der Netzhaut zum Schnitte kommen. Zwischen diesen beiden Lagen muss es notwendig eine Stellung der Strahlen geben, dass der Schnitt derselben genau auf der Netzhaut liegt. Die Entfernung des Gegenstandes, für welche dieses eintritt, ist die deutliche Sehweite. Für alle zwischen S und s liegenden Entfernungen akkommodiert unser Auge noch, indem wir von einem Mangel an genauer Akkommodation eben vermöge der Netzhautstruktur nichts merken.

Die Grösse k in unserer mathematischen Betrachtung spielt ganz genau die Rolle des Nahe, Fernpunktes und der deutlichen Sehweite. Das Vorzeichen von k hängt von der Differenz $H_{+1} - H_{-1}$ ab. Dem Scheinerschen Versuch zufolge ist aber für Objektspunkte diesseits des Nahepunktes H_{+1} grösser als H_{-1} und jenseits des Fernpunktes H_{+1} kleiner als H_{-1}; also dementsprechend die Differenz $(H_{+1} - H_{-1})$ das erstemal positiv und das zweitemal negativ zu gross als für bestehende Akkommodation notwendig wäre. In aller Strenge gilt aber für den Übergang aus dem Positiven ins Negative bei Einstellung auf deutliche Sehweite $(H_{+1} - H_{-1}) = o$; In Formeln drücken sich diese Grenzfälle, wie folgt aus:

$P_s = +1$ . . . Akkommodation auf den Nahepunkt.
$P_S = -1$ . . . Akkommodation auf den Fernpunkt.
$P_\Sigma = o$ . . . . Akkommodation auf deutl. Sehweite.

Deutlicher ergibt sich die geltende Akkommodationsbeziehung in folgender Übersicht:

$P > +1$ . . . Keine Akkommodation; Gegenstand diesseits des Nahepunktes. . . . . $(E < s)$;

$P = +1$ ..... Akkommodation auf den Nahepunkt ... obere Grenze der Akk. .... $(E = s)$;

$P < +1$ .... Zunehmende Akk.; $(s < E < \Sigma)$;

$P = 0$ .... Mittlere, möglichst gute Akkommodation für deutliche Sehweite $(E = \Sigma)$;

$P < 0$ .... Abnehmende Akk. $(S > E > \Sigma)$;

$P = -1$ .... Akkommodation auf den Fernpunkt; untere Grenze d. Akk. ..... $(E = S)$;

$P > -1$ ... Keine Akkommodation; Gegenstand jenseits des Fernpunktes, $(E > S)$

Für jedes Auge sind die Entfernungen S, s, Σ verschieden, für das Normalauge gilt nach allgemeiner Annahme:

$S = \infty$ ... Abstand des Fernpunktes.

$s = 100$ mm .. „ . „ Nahepunktes.

$\Sigma = 250$ mm deutliche Sehweite.

Die oben abgeleitete allgemeine Formel der Bildgrösse, gibt für die Grenzfälle der Akkommodation bezüglich H_{+1} und H_{-1} verschiedene Ausdrücke. Doch fällt dieser Unterschied, der sich allgemein ergab, nicht in Betracht, da wir ja wegen der geltenden Akkommodation diesen Unterschied nicht bemerken. Wir können bloss den Eindruck eines mittleren H, einer mittleren Bildgrösse, empfinden, welche sich als das arithmetische Mittel aus H_{+1} und H_{-1} allgemein durch den Wert:

Bildgrösse.

$$H_m = \frac{E w}{N r_2 r_3 (AE + d_1 r_1)} tg\,\alpha \text{ .... ergibt.}$$

Die erhaltene Formel zeigt die Proportionalität der Bildgrösse zur Tangente des Gesichtswinkels. Setzt man statt $tg\,\alpha$ .... $\frac{G}{E}$ und führt dadurch wieder die frühere Gegenstandsgrösse ein, so zeigt die Formel, dass die Bildgrösse mit wachsendem E abnimmt und für $G =$ endliche Grösse gegenüber $E = \infty$ gegen Null konvergiert; wichtige Gesetze, deren experimentelle Bestätigung allgemein feststeht.

Akkommodation der deutlichen Sehweite.

Die Akkommodation der deutlichen Sehweite, die für $k = o$ eintritt, lautet . . . $P = o$. Vereinfacht, stellt sich dieselbe durch die Formel dar:

$$P_{\Sigma} = \underline{x\Sigma + y = o}; \text{ und } H = \frac{\Sigma w}{Nr_2r_3\,(A\Sigma + d_1r_1)}\,tg\,\alpha;$$

Diese Akkommodationsbeziehung zeigt folgende, sehr merkwürdige Gesetze, welche, wie schon erwähnt, deswegen in aller Strenge gelten werden, weil diese Akkommodation das Übergangsstadium ist von der Einstellung auf die Ferne auf diejenige der Nähe. Die Beziehung ist:

1.) *Völlig übereinstimmend mit der mathematischen Akkommodation*, die oben besprochen wurde. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Gegenstandsweite . . . Σ . . . hier eine fest gegebene, für jedes Auge bestimmte Konstante ist, — beim normalen Auge $\Sigma = 250$ mm — während die Grösse E bei der mathematischen Akkommodation variabel war. Demgemäss akkommodiert unser Auge, falls der betrachtende Gegenstand in der deutlichen Sehweite sich befindet, am besten und mathematisch genau;

2.) *Unabhängig vom Pupillenradius* p; derselbe kann daher in diesem Falle, wofern er nicht andere uns noch unbekannte Funktionen zu erfüllen hat, voll und ganz die Lichtintensität des Netzhautbildchens regeln, damit das Auge keinen Schaden leidet.

3.) *Unabhängig von dem Gesichtswinkel* α; Die Akkommodation gilt desshalb für alle Gesichtswinkel, welche den früheren Voraussetzungen genügen. Unser Auge hat bei Einstellung auf deutliche Sehweite eine — wohl mittlere — beste Akkommodation, es übersieht einen Gegenstand gleichzeitig im Ganzen und seinen Teilen. Akkommodation auf Übersicht und Details fallen hier zusammen.

4.) *Unabhängig von den Netzhautkonstanten;* die Netzhautstruktur hat also in diesem Falle auf die Akkommodation anderen Akkommodationsbeziehungen gegenüber zum mindesten den geringsten Einfluss.

5. *Abhängig von denjenigen Grössen des Auges, welche das optische System desselben bedingen*, von den Brechungsexponenten, den Krümmungsradien, den Linsendicken.

6.) *Abhängig insbesondere von* Σ, *der deutlichen Sehweite* (250 mm normal.)

7.) *Abhängig von der Strahlengattung*, welche der leuchtende Körper in unser Auge zu senden vermag.

Akkommodatiou auf Nahe und Fernpunkt.

Die Akkommodation auf Nahe und Fernpunkt ergibt im allgemeinen keine besonderen Beziehungen und Gesetze. Nur für das Normalauge lässt die Einstellung auf den Fernpunkt, der unendlich weit entfernt ist, gewisse, besondere Merkmale erkennen:

Für $E = \infty$ entsprechend $k = -1$ geht die allgemeine Akkommodationsgleichung über in:

$$P_\infty = \frac{p x}{R_0 N r_2 r_3 A + \mu \, wtg \, \alpha} = -1;$$

Akkommodation des Normal-Auges auf den Fernpunkt.

Aus dieser Beziehung ist ohne weiteres ersichtlich, dass dieselbe eine physische Akkommodation und keine mathematische Akkommodation ausdrückt. Die Bedingung der mathematischen Akkommodation würde für den Fernpunkt . . . . $x = o$ lauten. Deutlich zeigt die Formel ihre Abhängigkeit:

1.) Vom Pupillenradius,
2.) Vom Gesichtswinkel,
3.) Von den das Auge bestimmenden Grössen und Konstanten, die alle vertreten sind,
4.) Von der Struktur der Netzhaut.

Insbesondere tritt aber in der Beziehung auffällig die Abhängigkeit der Grössen p . . r_2 und α voneinander hervor.

III. Teil.

Berechnungen.

Weiterhin bestrebt nun vorliegende Abhandlung an Hand der gefundenen Akkommodationsbeziehung . . . $P_{\Sigma} = o$ . . . als der am besten wegen der grossen Einfachheit geeigneten Formel, die bisher von den Forschern angegebenen Werte für die Bestimmungsstücke des Normalauges zahlenmässig zu prüfen.

Helmholtz gibt für das auf die Nähe akkommodierte Normalauge, — allerdings ohne nähere Angabe der Gegenstandsweite E, für welche die Werte gelten sollen, — folgende mittlere Werte an:

$r_1 = 8{,}0$ mm;
$r_2 = 6{,}0$ mm;
$r_3 = 5{,}5$ mm; $n = 1{,}33766$;) Angaben Helmholtz's
$d_1 = 3{,}2$ mm; $N = 1{,}08738$;) für die Nähe.
$d_2 = 4{,}0$ mm;
$d_3 = 15{,}03$ mm;

Diese Grössen wurden in die Beziehung P_{Σ} eingesetzt und ergaben für $\Sigma = 250$ mm:

$$P_{\Sigma} = x \cdot \Sigma + y = -5143{,}365451;$$

Hieraus ist ersichtlich, dass Helmholtz's Werte nicht für das auf deutliche Sehweite akkommodierte Auge Geltung haben dürften. Die Auflösung der Beziehung $P_{\Sigma} = o$ nach Σ unter Zugrundelegung der erwähnten Werte ergäbe . . . . . , $\Sigma' = 129{,}6$ mm.

Daraus muss nun geschlossen werden, dass, falls obige Werte für die deutliche Sehweite eines Auges gelten sollen, Helmholtz ein kurzsichtiges Auge, das $\Sigma' = 129{,}6$ mm als deutliche Sehweite hatte, durch seine Angaben bestimmt hat; oder, wenn die Angaben für das Normalauge bestimmt sind, dieselben ungefähr den Werten bei Akkommodation auf Gegenstände unweit des Nahepunktes entsprechen.

Berechnung der Grössen des Normal-Auges bei Akkommodation auf deutliche Sehweite.

Sowohl aus erwähntem Grunde, als auch wegen der unten sich ergebenden Beziehung das Volumen der Krystallinse betreffend und wegen der experimentellen Untersuchungen Dr. Heinrichs, nach denen derselbe bereits für 322 mm Gegenstandsweite bei centralem Sehen den Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche, also r_2, zu 10,6898 mm und 10,5908 mm berechnet und angibt, wird bei der weiteren Untersuchung von den oben angegebenen Werten abgegangen und werden als Grundlage der weiteren Rechnung folgende Werte angenommen, die nach Helmholtz und Dr. Heinrich ungefähr der Akkommodation des auf deutliche Sehweite eingestellten Normalauges entsprechend sein dürften:

$r_1 = 7{,}6$;	nach Dr. Heinrich	}	*Angenommene, wahrscheinliche Werte.*
$r_2 = 10{,}0$; . . .	„ „ „		
$r_3 = 6{,}0$;	„ Helmholtz		
$d_1 = 3{,}6$; . . .	„ „		
$d_2 = 4{,}0$;	„ „		
$d_3 = 15{,}03$; . . .	„ „		
$n = 1{,}33766$;	„ „		
$N = 1{,}08738$;	„ „		

Die Grössen $r_1 \ldots d_3 \ldots n \ldots N \ldots \Sigma = 250$ mm werden als fest bestimmt angenommen, während die übrigen Werte, welche, wie bekannt, durch die Akkommodation veränderlich sind, blos als ziemlich wahrscheinliche Näherungsangaben betrachtet werden sollen, die im Folgenden erst noch zu korrigieren sind.

Diese vier zu korrigierenden Grössen ($d_1 \ldots d_2 \ldots r_2 \ldots r_3$) haben zunächst die Akkommodationsbedingung zu erfüllen, nämlich . . . . $P_\Sigma = o$. Ausserdem müssen sie noch einer zweiten Bedingung genügen, die aus physikalischen Gründen notwendig ist, sie müssen nämlich sich stets so ändern, dass das Volumen der Kystallinse konstant bleibt.

Berechnet man nun stereometrisch das Volumen einer durch die Krümmungsradien r_2 und r_3 und durch die Dicke d_2

bestimmten Convexlinse, so ergibt sich dieses nach einfacher Rechnung durch den Ausdruck:

Volumen der Linse:

$$= \frac{\pi}{12} \cdot \frac{d_2^2}{(r_2 + r_3 - d_2)} \left[d_2^2 - 4\,d_2\,(r_2 + r_3) + 12\,r_2\,r_3\right]$$

Matthiessen gibt nun in dem Werke: „Beiträge zur Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane . . . Hermann von Helmholtz als Festgruss zu seinem siebzigsten Geburtstag dargebracht“ . . . . . den Kubikinhalt der Krystallinse des menschlichen Auges zu . . . 150 cmm an. Benützt man diesen konstanten Wert und setzt zur Abkürzung:

$$a = \frac{12 \cdot 150}{\pi} = 572{,}96 \text{ cmm},$$

so ergibt obige Volumengleichung folgende nunmehr von den Grössen . . . d_2 . . . r_2 . . . r_3 zu erfüllende Bedingungsgleichung:

Bedingung für konstantes Volumen:

$$V \equiv r_2\,(4d_2^3 - 12\,d_2^2 r_3 + a) - (d_2^4 - 4d_2^3 r_3 + a d_2 - a r_3) = o\,;$$

Berechnet man das Volumen der Linse nach den von Helmholtz angegebenen Werten des Akkommodationszustandes auf Nähe und ebenso nach den Angaben, die für das auf die Ferne akkommodierte Auge gelten sollen, so bekommt man für das Volumen der Linse die Werte . . . 129,0 cmm bezw. 164,9 cmm, wobei in letzteren Falle die Angaben gelten:

$r_1 = 8{,}0$ mm
$r_2 = 10{,}0$ mm
$r_3 = 6{,}0$ mm
$d_1 = 3{,}6$ mm
$d_2 = 3{,}6$ mm

} Helmholtz's Angaben für Akkommodation auf die Ferne.

Daraus folgt, dass die Angaben Helmholtz's schwerlich für ein und dasselbe Auge gelten dürften und bezüglich des Volumens der Linse nicht zu dem von Mathiessen experimentell gefundenen Werte führen.

Bezeichnet man mit . . . ϱ . . σ . . . δ_1 . . . δ_2 . . . die zu suchenden Correkturen, welche bei . . . . . r_2 . . r_3 . . d_1 . . . d_2 . . . notwendig sind, damit gleichzeitig von diesen Grössen die Akkommodationsgleichung und die Bedingung für konstantes Volumen erfüllt ist, so wird nun zu diesen zwei Bedingungen eine dritte weitere Bedingung gefügt, dass die Summe der Fehlerquadrate ein Minimum sein soll; also

$$\delta_1^2 + \delta_2^2 + \varrho^2 + \sigma^2 = \text{Minimum.}$$

Die Grössen:
$$\left.\begin{aligned} d_1' &= d_1 + \delta_1 \\ d_2' &= d_2 + \delta_2 \\ r_2' &= r_2 + \varrho \\ r_3' &= r_3 + \sigma \end{aligned}\right\} \text{(Corrigierte Werte.)}$$

haben demnach folgende drei Bedingungen zu erfüllen:

Bedingungs-Gleichungen:

1.) $P' \Sigma = o = (A\Sigma + d_1 r_1)(r_3 B - d_3 D) - r_2((n-1)\Sigma - r_1(d_2 r_3 + d_3 C);$

2.) $V' = o = r_2(4 d_2^3 - 12 d_2^2 r_3 + a) - (d_2^4 - 4 d_2^3 r_3 + a d_2 - a r_3);$

3.) $\Phi' = \delta_1^2 + \delta_2^2 + \varrho^2 + \sigma^2 = \text{Minimum};$

(Alles in gestrichenen Variablen geschrieben.)

Zur leichteren Berechnung dieser vier Correktionsglieder wird beachtet, dass dieselben nur von geringer Grösse sein können, und deshalb die komplizierten Gleichungen P' und V' durch ihre Entwicklungen nach δ_1 . . δ_2 . . ϱ und σ ersetzt werden können, wobei die Glieder der ersten Ordnung nur berücksichtigt werden. Dadurch ergeben sich lauter lineare Gleichungen, die einfach zu lösen sind. Wiederholte Anwendung desselben Prinzipes mit den nunmehr korrigierten Werten ergibt die Werte δ_1 . . δ_2 . . ϱ . . σ immer genauer, wie die Ausführung auch zeigte, die im Folgenden kurz dargelegt ist Die einfachen 3 Bedingungsgleichungen lauten:

Angenäherte Bedingungs-Gleichungen:

$$P'_{\Sigma} = P + \frac{\partial P}{\partial d_1}\delta_1 + \frac{\partial P}{\partial d_2}\delta_2 + \frac{\partial P}{\partial r_2}\varrho + \frac{\partial P}{\partial r_3}\sigma = o;$$

$$V' = V + \frac{\partial V}{\partial d_2}\delta_2 + \frac{\partial V}{\partial r_2}\varrho + \frac{\partial V}{\partial r_3}\sigma = o;$$

$$\Phi' \equiv \delta_1^2 + \delta_2^2 + \varrho^2 + \sigma^2 = \text{Minimum.}$$

Nach den Regeln der höheren Mathematik über Maxima und Minima muss aber nun auch die Bedingung erfüllt sein:

$$\Phi + \chi P'_{\Sigma} + \xi V' = \text{Minimum.}$$

worin . . . χ und ξ . . . neu eingeführte Unbekannte bedeuten. Diese neue Bedingung zerfällt aber in folgende sechs lineare Gleichungen, welche die Unbekannten . . . . . δ_1 . . δ_2 . . ϱ . . σ . . . χ . . . ξ . . . zu berechnen gestatten:

1.) $2\delta_1 + \chi \frac{\partial P}{\partial d_1} = o;$ . . . . . .

2.) $2\delta_2 + \chi \frac{\partial P}{\partial d_2} + \xi \frac{\partial V}{\partial d_2} = o;$ . . . . . .

3.) $2\varrho + \chi \frac{\partial P}{\partial r_2} + \xi \frac{\partial V}{\partial r_2} = o;$ . . . . .

4.) $2\sigma + \chi \frac{\partial P}{\partial r_3} + \xi \frac{\partial V}{\partial r_3} = o;$ . . .

5.) $P'_{\Sigma} = o;$
6.) $V' = o;$ } Angenäherte Bedingungsgleichungen.

Diese sechs Gleichungen nach den sechs Unbekannten aufgelöst ergeben:

$$\chi = \frac{2 \cdot (P \cdot \beta - V\gamma)}{\alpha\beta - \gamma^2}; \qquad \xi = \frac{-2 (P\gamma - V\alpha)}{\alpha\beta - \gamma^2};$$

$$\text{wobei: } \alpha = \left(\frac{\partial P}{\partial d_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial d_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial r_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial r_3}\right)^2;$$

$$\beta = \ldots\ldots \left(\frac{\partial V}{\partial d_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial r_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial r_3}\right)^2;$$

$$\gamma = \frac{\partial P}{\partial d_2} \cdot \frac{\partial V}{\partial d} + \frac{\partial P}{\partial r_2} \cdot \frac{\partial V}{\partial r_2} + \frac{\partial P}{\partial r_3} \cdot \frac{\partial V}{\partial r_3};$$

$$\delta_1 = -\frac{\chi}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial d_1}; \ldots\ldots \qquad \delta_2 = -\frac{\chi}{2} \frac{\partial P}{\partial d_2} - \frac{\xi}{2} \cdot \frac{\partial V}{\partial d_2};$$

$$\varrho = -\frac{\chi}{2} \frac{\partial P}{\partial r_2} - \frac{\xi}{2} \cdot \frac{\partial V}{\partial r_2}; \ldots \qquad \sigma = \frac{\chi}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial r_3} - \frac{\xi}{2} \cdot \frac{\partial V}{\partial r_3};$$

Die ziemlich umständliche und langwierige Zahlenrechnung ergab nach viermaliger, dem oben erwähnten Prinzip entsprechender Wiederholung und erneuten Correktur schliesslich die Zahlenwerte für die zu berechnenden Grössen:

. . . . d_1' . . . d_2' . . . r_2' . . . r_3' . .

Ergebnis

der Zahlen-Rechnung:

Berechnete neue Werte:		*Frühere Mittelwerte*
$d_1' = 3{,}79$ *mm* . . .	gegen	$d_1 = 3{,}6$ *mm*;
$d_2' = 3{,}90$ *mm*	„	$d_2 = 4{,}0$ *mm*;
$r_2' = 9{,}81$ *mm*	„	$r_2 = 10{,}0$ *mm*;
$r_3' = 5{,}59$ *mm*	„	$r_3 = 6{,}0$ *mm*;

Die gefundenen neuen Werte sind auf 2 Dezimalstellen aus ursprünglich auf 6 Dezimalen gerechneten Werten abgekürzt, welch' letztere dem Ergebnis der Rechnung zufolge gleichzeitig die Grössen . . . P und V . . ., die sich nach den früheren angenommenen Mittelwerten zu . . . $P_\Sigma = +\ 2586{,}91$ und . . . . $V = -\ 804{,}48$ . . . . ergeben, auf die Werte . . . . . $P_\Sigma = -\ 0{,}008$ und $V = +\ 0{,}006$ . . . . herabdrückten und demnach völlig den Anforderungen entsprachen, welchen sie genügen sollten. Auch für die abgekürzten Werte wurden die Grössen . . . . P_Σ und V . . . . berechnet und beide mit Berücksichtigung der dieser Abkürzung entsprechenden Genauigkeit als gegen Null konvergierend erhalten.

Demgemäss gelten für das normale Auge bei Akkommodation auf deutliche Sehweite folgende Angaben:

Normal-Auge
bei Akkomodation auf deutliche Sehweite:

$$r_1 = 7{,}60\ mm;\ \ldots\ d_1 = 3{,}79\ mm;$$
$$r_2 = 9{,}81\ mm;\ \ldots\ d_2 = 3{,}90\ mm;$$
$$r_3 = 5{,}59\ mm;\ \ldots\ d_3 = 15{,}03\ mm;$$
$$n = 1{,}33766;$$
$$N = 1{,}08738;$$
$$a = 572{,}96\ cmm;$$
$$\Sigma = 250\ mm.$$

Hieraus berechnen sich Brennweite und Bildgrösse:

$$\text{Brennweite} = \frac{r_3\,(AB - d_2 r_2 (n-1))}{AD + Cr_2\,(n-1)} = \underline{13{,}88\ mm.}$$

$$\text{Bildgrösse} = \frac{\Sigma w\ tg\ \alpha}{N r_2 r_3 (A\Sigma + d_1 r_1)} = \underline{15{,}01\ tg\ \alpha\ mm.}$$

Diese genau berechneten Zahlenwerte zeigen folgende wichtige Eigenschaften:

1.) Sie entsprechen vollständig den mittleren ungefähr bekannten Grössenverhältnissen des Normalauges; insbesondere zeigt das berechnete r_2 die Uebereinstimmung mit den von Dr. Heinrich angegebenen experimentell gefundenen Werten, während r_3 sich merkwürdigerweise durch die Correktur so erniedrigt hat, dass es ungefähr dem von Helmholtz angegebenen Werte bei Akkommodation auf Nähe gleichkommt.

2.) Sie liegen innerhalb der physikalisch zulässigen Grenzen und sind der hier angewandten Berechnungsmethode der kleinsten Fehlerquadrate zufolge die weitaus wahrscheinlichsten Werte.

3.) Sie erfüllen völlig die unbedingt geltende Akkommodationsbeziehung für deutliche Sehweite, welche desshalb in aller Strenge gelten muss, weil sie den Uebergang bildet von der physischen Akkommodation auf Nähe zu der auf die Ferne.

4) Sie werden auch vollständig der Volumengleichung gerecht, sodass nun der Kubikinhalt der Krystallinse der Angabe Matthiessens . . . 150 cmm . . . ganz entspricht.

Die Ergebnisse obiger Betrachtungen und Berechnungen kurz zusammengefasst lassen erkennen, dass die gewöhnlich in Lehrbüchern angegebenen Werte der Bestimmungsstücke unseres auf die Ferne akkommodierten Auges dieser Voraussetzung nicht entsprechen dürften, sondern ungefähr den Akkomodationszustand der deutlichen Sehweite bestimmen. Die Berechtigung dieser Behauptung geht deutlich aus den Experimenten Dr. Heinrichs hervor, der gezeigt hat, dass der Krümmungsradius der Linsenvorderfläche sich bedeutend nach oben hin je nach der Entfernung des fixierten Gegenstandes vergrössern kann und muss. So giebt z. B. Dr. Heinrich für r_2 folgende experimentell bestimmte Angaben: (Mittel aus 30 Messungen)

r_2	=	10,6898	bei	Fixieren	eines	Punktes	in	32,2 cm Entf.
r_2	=	15,4830	„	„	„	„	„	384,0 „ „
r_2	=	17,0620	„	„	„	„	„	1500,0 „ „

(Tabelle VII.)

Die ganze vorliegende Berechnung mit anderen konstanten Grössen (r_1 d_3 a Σ) durchgeführt, ergäbe natürlich andere und wieder andere Werte für die Variablen (r_2 r_3 d_1 d_2) und dadurch selbst bei unveränderten Σ = 250 mm die Einrichtung für ein anderes Normalauge, woraus man ersieht, dass der Begriff „Normalauge“ nicht eindeutig sein kann, sondern in allerdings sehr engen Grenzen schwankend ist, wenn man nicht annimmt, dass unser Auge noch andere uns unbekannte Funktionen zu erledigen hat, welche eine derartige Schwankung ausschliessen. Von diesem Standpunkt aus betrachtet stellt obige Zahlenrechnung demgemäss nur ein Beispiel dar für die wahrscheinlichste, zahlenmässige Auswertung der Grössenverhältnisse eines Normalauges, das allen uns bekannten Anforderungen genügen dürfte.

Es würde jetzt nur noch erübrigen auf die gleiche Weise wie oben, nur in bedeutend komplizierterer Form, die anderen Grenzfälle der Akkommodation einer Zahlenrechnung zu unter-

ziehen, doch würde dies nicht zweckmässig sein, da eine derartige Berechnung einer allgemeinen Behandlung der Akkommodation gegenüber keine wesentlichen Vorteile bietet, wie leicht aus den allgemeinen Formeln zu ersehen ist, abgesehen von der Unmöglichkeit der Durchführung einer solchen Rechnung, die ja nur für das bereits herausgegriffene und berechnete Auge Bedeutung haben würde, für welches aber erst aus der allgemeinen Akkommodations- und Volumengleichung weitere Masszahlen abzuleiten wären neben der experimentellen Bestimmung der Grössen $p \ldots R_0 \ldots \mu$.

Dass die oben berechneten Werte der Bestimmungsstücke des auf deutliche Sehweite eingestellten Normalauges auch gut mit den sonstigen experimentellen Untersuchungen übereinstimmen, dafür kann folgendes Beispiel dienen:

Welcker gibt als Grenzwinkel, unter welchem wir gerade noch zwei Punkte getrennt sehen, die Grösse . . . 50 Sekunden $= 2\,\alpha$ . . an. Berechnet man nun die Bildgrösse . . . H . . . mit Benützung der ermittelten Werte, so ergibt sich:

$$H = R_0 = \varrho_0 + e_0 \qquad 15{,}01'\ tg\ 25'';$$
$$2\,R_0 = 0{,}0037230\ mm.$$

Diese Zahl stimmt sehr gut mit den Angaben Welckers überein, der experimentell für den Durchmesser der Netzhautelemente (Zapfen) . . . . . $2\varrho_0 = 0{,}0031$ bis $0{,}0036$ mm angibt, wenn man beachtet, dass hier . . . $2R_0$ . . . die Gesammtbreite des lichtempfänglichen Netzhautelementes mit den beiderseitigen Zwischenräumen darstellt und demzufolge sich der Durchmesser des Netzhautelementes ($2\varrho_0$) zu . . . . . $2\varrho_0 = (0{,}0037230 - 2e_0)$ mm . . . . berechnet.

Am Anfang vorliegender Abhandlung wurde auf die Experimental-Arbeit Dr. Heinrichs hingewiesen mit der Bemerkung, dass sich beide Arbeiten zum Teil ergänzen, indem die eine als experimentelle bezw. mathematische Bestätigung und Erklärung der andern gelten kann. Es ist nun hier am Platze kurz nochmals auf die gewonnenen Gesetze hinzuweisen, die alle vorzüglich mit dem Ergebnis der Experimental-Untersuchung Dr. Heinrichs übereinstimmen.

Die mathematischen auf Grund physikalischer Thatsachen berechneten Formeln zeigen uns Folgendes:

1.) Unser Auge bedingt für alle in dasselbe eintretenden Strahlen einen physischen Akkommodationszustand; die Akkomodation auf deutliche Sehweite ist als Specialfall eine mittlere denkbar günstigste, mathematische Akkommodation, während die Einstellungen auf Nahe und Fernpunkt Grenzfälle von Akkommodation sind.

2.) Diese physische Akkommodation auf die Lage und Grösse des fixierten Gegenstandes bestimmenden äusseren Grössen . . . E und $tg\,\alpha$ . . . ist abhängig von sämmtlichen das optische System unseres Auges bedingenden Grössen und von den Netzhautelementen.

3.) Insbesondere sind es die Variablen r_2 und p, welche unterstützt von den übrigen Grössen den Akkomodationsmechanismus regeln.

4.) Einer Vergrösserung des Gesichtswinkels (α) bei konstanter Gegenstandsweite und bei möglichst gleichbleibender Akkomodationsstärke (k) entspricht eine Vergrösserung der Pupille. Ueberhaupt hat diese Vergrösserung des Gesichtswinkels eine derartige Veränderung der Akkommodation zur Folge, dass diese sich der Akkommodation für die Ferne nähert. Die Einstellung auf Uebersicht ist daher ungefähr eine Akkommodation auf die Ferne.

Für die letztere (unter Nr. 4) aufgestellte Behauptung ist noch der Beweis zu liefern, der auf folgende Weise gegeben werden kann: Wird ein gewisses k (= Akkommodationsstärke) festgehalten, dessgleichen ein besimmtes $E > \Sigma$, während $G = E\,tg\,\alpha$ oder Winkel α vergrössert wird, so wird sich der Werth des Quotienten P hierdurch erniedrigen. Um diese Veränderung wieder auszugleichen muss sich, wie wir bereits gesehen haben, die Pupille (p) vergrössern. Indess kann, wie man wohl annehmen darf und wie aus den Versuchen Dr. Heinrichs hervorgeht, nicht ganz allein die Pupille wieder den ganzen Ausgleich bewirken, es müssen sich auch die übrigen Grössen des Auges beteiligen, insbesondere aber der Radius der Linsen-

vorderfläche entsprechend seiner Sonderstellung in der mathematischen Formel. Nun ist aber über diese Aenderung des Krümmungsradius schwer zu urteilen, da dieser in der Formel nicht in einfacher Form auftritt. Man kann sich aber diesen Augleich *idell* dadurch zustande gebracht denken, dass man sich die Grösse E momentan verändert denkt. Um aber den zu kleinen Wert des Bruches P wieder zu vergrössern, müsste E grösser genommen werden, da ja mit wachsendem E, wie aus den Formeln erhellt, der absolute Wert von P bis zum Grenzwert *1* wächst. Es ist also hieraus ersichtlich, dass eine ideelle Vergrösserung der Gegenstandsweite (E) die Vergrösserung des Gesichtswinkels (α) auszugleichen vermöchte. Nun soll aber der Annahme nach E und die Akkomodationsstärke (k) konstant bleiben; es müssen sich dann unbedingt die variablen Grössen des Auges so ändern, als ob das Auge auf eine grössere Gegenstandsweite, d. h. auf die Ferne akkommodieren würde. Die Akkommodation auf Uebersicht ist also eine Detail-Akkommodation auf centrale ferne Punkte.

Nach Erledigung der in gegenwärtiger Abhandlung vorliegenden mathematischen Untersuchung der Akkommodation, ist es von Interesse, kurz noch auf den Weg hinzuweisen, der bei der weiteren Betrachtung der allgemeinen Akkommodationsbeziehung einzuschlagen wäre. Diese Untersuchung, die als für die jetzige Arbeit viel zu umfangreich vorbehalten wird, hat sich zunächst damit zu befassen, die allgemeinen Formeln der Akkommodations und Volumengleichung durch einfachere, angenährte zu ersetzen, ferner über die variablen Grössen durch neue Funktionsgleichungen zweckmässig zu verfügen, um dann rechnerisch jeden beliebigen Akkommodationszustand, insbesondere aber den der Grenzfälle für ein und dasselbe Auge beschreiben und erklären zu können. Ausserdem soll dann von einfarbigem Licht abgegangen und die physische Akkommodation für weises Licht abgeleitet werden, um dadurch den allgemeinsten Fall der Akkommodation, der am meisten der Wirklichkeit entspricht, kennen zu lernen.